

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
計畫名稱：海龍替代物滅火劑性能評估之數值模擬
Numerical Simulation for the Performance Evaluation
of Halon Replace Agents Over Tsuji Burner

計畫編號：NSC 87-2212-E-009-037

執行期限：86/8/1~87/7/31

主持人：陳俊勳 交通大學機械系 教授

一、中文摘要

本文係以數值計算解析來作海龍替代物滅火劑性能評估設備之先導性研究。流場係液氣二相流，該二相流流過由 Tsuji Burner 所造成之二維層流擴散對沖火焰，藉由液滴大小、質量以及二相流流速的變化來找出使火焰熄滅時之臨界伸展率和臨界液滴濃度的關係，評估海龍替代品和水比較的滅火效率。

除了 Damkohler number 和燃料噴出速率外，加諸於空氣中的水蒸氣或液滴也會影響火焰的穩定性，原因是吸熱及降低反應氣體的濃度。隨著進口水蒸氣濃度的增加，火焰型態直接由包封火焰至吹滅，可知其主要影響因素是在於化學反應部份。

關鍵詞：海龍替代品，二相流，多孔燃燒器，擴散對沖火焰，火焰伸展率，臨界液滴濃度，滅火效率

Abstract

This thesis is to apply the numerical algorithm to simulate the fire extinction performance evaluation apparatus for agents of Halon replacement. The flow field is liquid-gas two phase flow. This two-phase flow is past a two-dimensional, laminar counterflow diffusion flame established by a Tsuji burner. Via the variations of droplet size and mass and flow velocity to distinguish the flame, the maximum concentration of the suppressant as a function of stretch rate at a fixed fuel ejection velocity can be determined. This process can be used to evaluate the fire suppression efficiency of new agents by comparing with that of water droplet.

Besides the effects of Damkohler number and fuel ejection rate, the vapor fraction and droplets affect the flame stability. It is caused by heat absorption and the decrease of fraction in reactants. As vapor fraction is increased, an envelope flame is blown off directly. This behavior is caused by decrease of chemical reaction rate.

Keywords: Halon replacement agents, two-phase flow, Tsuji burner, counterflow, stretch rate, droplet concentration, fire suppression efficiency

二、研究動機與目的

海龍係對電機電子及可燃液體和氣體等火災為最有效之滅火劑[1]，但它也是破壞臭氧層的物質之一。自禁用以來，美國就支持許多尋找相關替代品[2]的研究計畫，並發展有關的小尺寸滅火性能評估技術，以期標準化來供工業界使用。其中，懸浮液體粒子(droplet/ Aerosol)輸送系統[3]擬採用 Dressler 所設計之液滴產生器[5]來產生 25~250 μm 的液滴，但須使用多重噴嘴，將粒徑送至吹向擴散火焰的空氣流中。此項實驗裝置首先採用水當比較基礎，即先將固定量的水液滴噴入向上空氣流中，將其攜帶至 Tsuji Burner (半徑為 25mm) [4]所產生固定強度的擴散火焰，來觀察其對火焰的影響，經由此過程找出可使火焰熄滅的最低臨界水量。再來置換其它液體滅火劑，也經由類似的過程和水作比較來評估其滅火效率。另外這種方法也適用於評估氣體滅火劑。

本研究即針對該項實驗，應用過去已有的研究成果[6][9]，再加上液滴模式，發展相對應的數值模式，對液體、氣體或兩者混合之新式滅火劑作有效的評估。藉由液滴大小、質量以及流速的變化，找出使火焰熄滅之臨界伸展率和臨界液滴濃度的關係，評估水的滅火效率，作為其它滅火劑滅火效率評估之先導研究。

三、研究內容及方法

本研究主要是解包含燃燒現象的二維強制對流問題，假設半徑 R 之二維多孔燃燒器為無限長圓柱，故採用二維假設，並且不考慮重力場。為避免燃料進入圓柱下游方向的 wake 區，假設只有在圓柱上游方向的半圓有燃料噴出，燃料為甲烷，燃燒反應採用有限速率的全反應。液滴數量為二十顆，起始分佈為等距，起始大小相等。

由於本研究包含了液氣二相流，必需採用兩種不同的模式分別解出氣相和液相的行為，並考慮兩相間的熱傳和質傳現象。氣相和液相分別利用 Eulerian approach 和 Lagrangian approach 來描述，其複雜的交互作用如圖一所示。

四、數學模式

Gas phase Combustion

完整的氣相燃燒模式可在許多燃燒的教科書中得到，為了使問題更易於處理，採取了以下的

假設:

- (1) 流場為一個二維、穩態的Laminar Flow，為強制對流問題，不考慮重力場。
- (2) 平均分子量為定值。
- (3) 混和氣體為具有相同比熱的理想氣體，擴散係數、Prandtl number、Lewis number和 $\rho\mu$ 為定值。
- (4) 流場為低速流，忽略黏性耗散和壓縮功。
- (5) 不考慮Soret、Duffour效應以及壓力梯度造成的擴散現象。
- (6) 忽略輻射熱傳效應。
- (7) 氣相化學反應為一次全反應。
- (8) 反應速率由 Arrhenius Law表示。

Droplet Phase Equation

為了處理液滴在氣相中的行為，採用 Crowe et al.所提出的 Particle-Source-In Cell Model [7]。此模式亦被應用於 spray-drying 以及 atomizer 之研究。

液滴在流場中的速度、溫度、軌跡由

Lagrangian form 來表示，並做以下假設:

- (1) 液滴的蒸發過程是 quasi-steady，意即在任一瞬時均可考慮為穩態。
- (2) 液滴為 single-component 的液體，且不會溶解任何氣體。
- (3) 液滴濃度相對於氣相流場相當稀薄。
- (4) 液滴外形為球狀，不考慮液滴的形變以及內部旋轉，內部溫度為均一分佈。
- (5) 當液滴受流場加熱至沸點時，假設液滴溫度即為沸點溫度，因為在實際狀況下，液滴表面溫度只略低於沸點溫度。
- (6) 液滴的熱物理性質如熱傳導係數、密度、比熱為定值。

液滴的運動方程式:

$$\mathbf{m}_d \frac{d\mathbf{v}}{dt} = C_D(\mathbf{U} - \mathbf{V})|\mathbf{U} - \mathbf{V}| \frac{A_d}{2}$$

其中 C_D 為阻力係數， \mathbf{V} 為液滴速度， \mathbf{U} 為氣相流場速度， \mathbf{m}_d 為液滴質量， A_d 為液滴面積。

定義液滴的雷諾數 $Re_d = \rho \frac{|\mathbf{U} - \mathbf{V}|d}{\mu}$ ，其中 d 為液滴直徑。

對於無蒸發的液滴阻力係數 C_D 可由液滴雷諾數關係式表示為： $C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687})$

液滴質量減少速率可表示為:

$$\frac{dm_d}{dt} = -Sh\rho D\pi d(Y - Y_\infty)$$

number, $Sh = 2 + 0.6 Re_d^{0.5} Sc^{0.33}$, $Sc = \frac{\mu}{\rho D}$, D 為擴散係數， Y 為液滴表面的 mass fraction, Y_∞ 為

氣相流場的 mass fraction。

液滴的熱平衡方程式為:

$$\mathbf{m}_d c_d \frac{dT_d}{dt} = \dot{q} + h_{fg} \frac{dm_d}{dt}$$

， \dot{q} 為氣相對液滴的熱傳率， c_d 為液滴的比熱， h_{fg} 為液滴蒸發潛熱。

$$\dot{q} = Nu \pi k d (T_g - T_d)$$

， k 為液滴的熱傳導係數， Nu 為 Nusselt number。 $Nu = 2 + 0.6 Re_d^{0.5} Pr^{0.33}$, $Pr = \frac{\mu}{\rho k}$

在此模式中，液滴在運動過程的熱質傳為氣相方程式提供了氣相偏微分方程式中的 source term，統御方程式如下列方程式及表一所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u z \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v z \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = S_\phi + S_\phi^P$$

方程式	ϕ	Γ	S_ϕ	S_ϕ^P
能量	$C_p T$	K	\dot{Q}	$-h_{fg} \dot{m}_{dg}$
燃料	Y_F	ρD	$\dot{\omega}_F$	0
氧氣	Y_O	ρD	$\dot{\omega}_O$	0
Vapor	Y_{H_2O}	ρD	0	\dot{m}_{dg}

表一 Γ 為各相關的擴散係數

其中 S_ϕ^P 是由液滴和氣相間交互作用所產生的 source term, \dot{m}_{dg} 代表單位時間內液滴轉換為氣相的量， h_{fg} 代表蒸發的潛熱， $\dot{\omega}_i$ 則為各成份之產生率。

在本研究中，較重要的無因次參數有 Da 為 Damkohler number, 其意義為氣相流經流場的時間 (gas resident time) 和化學反應時間的比值 (chemical reaction time)。

考慮軸對稱的幾何形狀，氣相流場由 SIMPLE[8] 數值方法解出，再與液滴方程式交互疊代至收斂。

五、結果與討論

在氣相問題方面，首先討論在乾空氣流場中，兩個參數 Damkohler number Da 及燃料噴出速率 \dot{w} 對火焰的穩定性的影響，以及進口空氣濕度的影響。

(1) The effect of varying Damkohler number

經由改變進口速度 U_{in} 以改變 Da ，相對於固定的燃料噴出速度，進口速度對火焰穩定性有較大的影響，因為火焰拉伸率 (flame stretch rate) 的增加使得火焰區域擴大，影響化學反應機制造成熄滅。表二及圖二分別表示各種 Damkohler number 下的火焰型態及流場溫度分佈，在此採用固定的燃料噴出速率 $\dot{w}=0.5$ 。

Case	Da	$2U_{in}/R$	Flame type
A1	20	100	Envelope
A2	14.28	140	Envelope

A3	13.64	146.67	Side
A4	11.54	173.33	Side
A5	10.0	200	Wake
A6	8.82	226.67	Wake
A7	7.5	266.67	Blowoff

表二 Effect of varying Damkohler number

其中，A1 及 A2 為包封火焰(envelope flame) 型態，火焰可將多孔燃燒器完全包圍住。經仔細比較可以發現，A1 的火焰厚度較 A2 大，這是因為 A1 的進口速度較慢，火焰可存在較上游的位置。此時反應最劇烈的位致為圓柱前端的 stagnation zone，圖三為 A2 的燃料及氧濃度分佈，由濃度分佈可知包封火焰為擴散火焰(diffusion flame)，而燃料及氧濃度互相重疊的部份非常小，且濃度已經相當低，可知在流場前端的反應相當劇烈，經由流場將熱量帶到下游，以致於溫度較高。由於流場在圓柱下游的 wake 區發生迴流現象(recirculating flow)，流場將燃料帶進 wake 區，使得 wake 區的燃料濃度相當高。

逐漸將 Da 減小，在 stagnation 區域的火焰前端被吹滅(blow off)，此一現象也表示下游燃燒所產生的熱量不足以預熱上游部份，此效應稱為 flame stretch effect。直到可達到穩定燃燒的區域，因而造成側焰(side flame)的型態，如 case A3 及 A4，此時反應最劇烈的部份為側面。由於 stagnation zone 沒有發生燃燒，使得燃料和氧在此區域混合，流到側邊再發生燃燒，所以側焰同時具有擴散火焰和預混火(premixed flame)的特徵。

若再將 Da 降低，如 case A5 及 A6，側焰完全消失，火焰前端位於圓柱後方 wake 區，稱為尾焰(wake flame)，尾焰已接近不穩定狀態，此時得依靠迴流將火焰穩定住。而燃料和氧已經在上游預混，再流到 wake 區發生燃燒，所以尾焰是一種預混火焰，而預混火焰的特性為反應速率較擴散火焰快速，所以即使反應區域不如包封火燄來得大，還是能提供相當大的熱量。若再將 Da 降低到約 7.5，便無法在圓柱周圍發生穩定的燃燒反應，此時火焰即告吹滅(blow off)。

(2)The effect of changing fuel-ejecting rate

在此採用固定的 Damkohler number 及 flame stretch rate，考慮不同的燃料噴出速率 fw 對火焰穩定的影響，火焰型態及流場溫度分佈如表三及圖四所示。

Case	fw	Flame type
B1	0.5	Envelope
B2	0.3	Envelope
B3	0.1	Envelope
B4	0.09	Wake
B5	0.03	Blowoff

Da=20 and $2U_{in}/R=100$ for all cases

表三 Effect of changing fw

由溫度分佈可以發現當 stagnation 區域的火焰被吹滅後，火焰型態直接由包封火焰轉遺移到尾焰，並沒有側焰發生，和 case A 的火焰拉伸率效應(flame stretch rate effect)相當不同。這樣的現象主要是因為當燃料噴出速率降低，熱量產生也隨之減少，而管壁又吸收太多熱量，使得側焰無法發生，而尾焰與管壁接觸面積相對較小，由管壁散失的熱量則小得多，火焰才得以在 wake 區穩定。除此之外，B3 和 B4 的溫度分佈也存在一個相當有趣的現象，相對於 B3，雖然 B4 的燃料噴出速率降低，但火焰高溫部份的溫度反而升高，B3 和 B4 的插異在於一為包封火焰，另一為尾焰，而包封火焰為一種擴散火焰，尾焰則趨向預混火焰。此處因為預混火焰的應較擴散火焰來得劇烈，使得 B4 的火焰溫度反而升高，此一高溫也有助於火焰於 wake 區的穩定。

(3)The effect of inlet air humidity

由於液滴模式與氣相之交互作用相當複雜，單一液滴即已經有相當多的研究，目前在液滴模式及程式中仍有許多問題待解決。在此儘考慮不同的進口濕度對火焰穩定的影響，但過高的濕度會因為超過飽和蒸氣壓而造成水滴的凝結，在此不考慮飽和蒸氣壓的影響，此一假設也類似於在進口空氣中混入惰性氣體或氮氣或降低氧濃度所造成的影響。在此採用固定的 Damkohler number、flame stretch rate 及 fw，考慮不同的進口空氣濕度對火焰穩定的影響，火焰型態及流場溫度分佈如表四及圖五所示。

Case	$Y_{H_2O_{in}}$	Flame type
C1	0.1	Envelope
C2	0.18	Envelope
C3	0.19	Blowoff

Da=20、 $2U_{in}/R=100$ and fw=0.5 for all case

表四 Effect of humidity

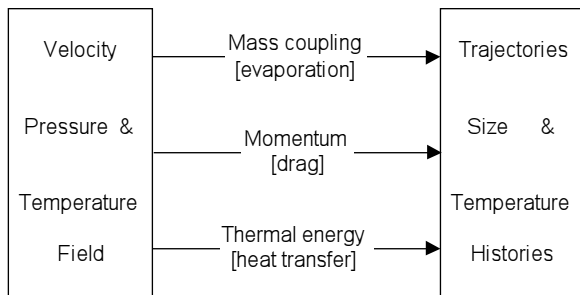
由溫度分佈圖可以看出，空氣濕度對火焰的影響並不在於火焰型態，而在於化學反應。當進口空氣中的蒸氣質量比例由 0 增加到 0.18 的過程中，火焰均為擴散火焰，當達到 0.19 就發生熄滅，連 case B 當中的尾焰型態都沒有發生。空氣中水蒸氣的增加造成氧濃度降低，燃燒反應受到箝制，熱量產生也隨之降低。一但 stagnation 區域的燃燒熱扣掉經由管壁的熱耗散，所殘餘的熱量仍無法預熱燃料及支持燃燒，火焰只好向下游移動尋求可支撐燃燒的區域，在此不但無法形成側焰，連反應較劇烈的尾焰都無法穩定就直接被吹滅。可見控制化學反應亦對燃燒有相當大的影響。

六、參考文獻

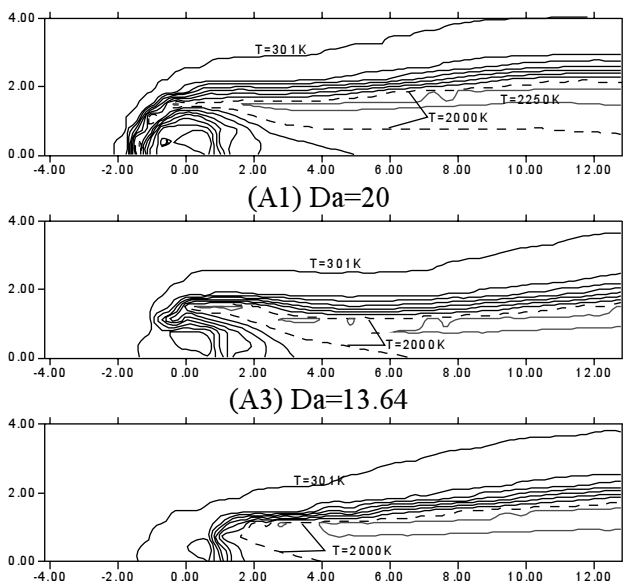
[1]The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Editor: DiNenno, P.J.,

NFPA, Quincy, MA, 1995.

- [2] Fire Suppression System Performance of Alternative Agents Editor: Gann R.G., NIST SP 890, 1995.
- [3] Grosshandler, W.L., Yang, Jiann C. and Cleary, G. C., 'Aerosol and SPGG Technology for Fire Research, NISTIR 5904, 1996.
- [4] Tsuji, H. and Yamaoka, I., 'The Counterflow Diffusion in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder,' Eleventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, 1967.
- [5] Dressler, J.L., U.S. Patent No. 5,248,087, 28 September, 1993.
- [6] Chen, C.H. and Weng, F.B., 'Flame Stabilization and Blowoff Over a Porous Cylinder,' Comust. Sci. and Tech., Vol. 73, p.427, 1990.
- [7] Crowe, M.P. Sharma, and D.E. Stock, The Particle-Source-In Cell Model for Gas-Droplet Flows, J. Fluid Eng., vol.99, pp. 325-332, 1977
- [8] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, London, 1980.
- [9] Liu, C.C., Tien, J.H. and Lin, T.H. 'Extinction Theory of Stretched Premixed Flames by Inert Spray,' Combust. Sci. and Tech., Vol. 91, p.309, 1993.

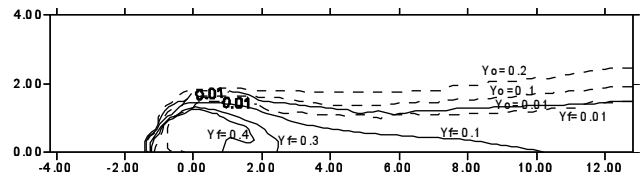


圖一、Gas-droplet coupling phenomena

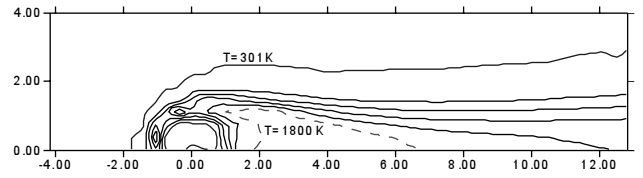


(A5) $Da=10$

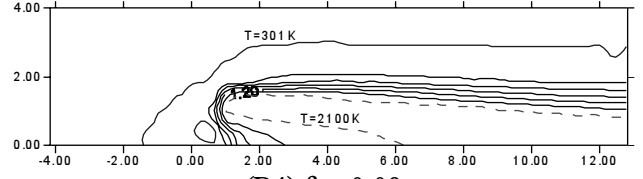
圖二、各種 Damkohler number 下的流場溫度分佈



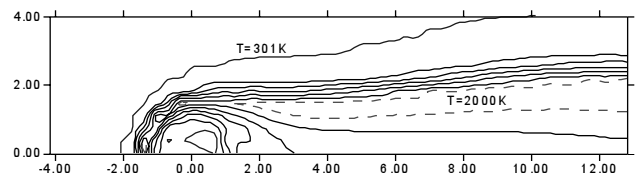
圖三、case A2 燃料及氧濃度分佈



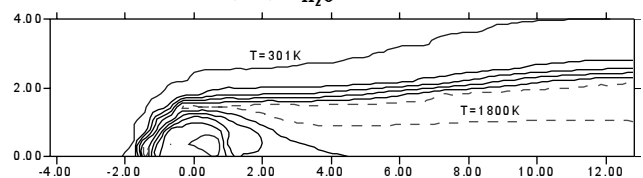
(B4) $fw=0.09$



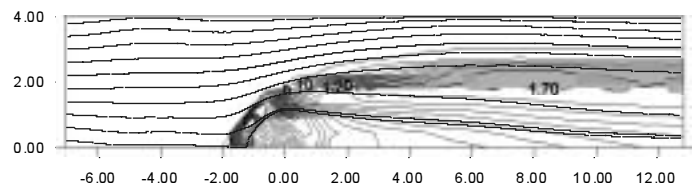
圖四、不同燃料噴出速率 fw 下的流場溫度分佈



(C2) $Y_{H_2O_{\infty}}=0.18$



圖五、不同進口空氣濕度的流場溫度分佈



圖六、液滴於流場中之運動軌跡